

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П.КОРОЛЕВА»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
ИХ ВЕЛИЧИНЫ, ЗНАКА И ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕ-  
НИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЗАГОТОВОК  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ДЖОНСОНА-КУКА**

*Методические указания к лабораторной работе*

САМАРА 2017

УДК 621.914.1

Составители: *Евдокимов Д.В.*

Рецензент: д.т.н., профессор Н.Д. Проничев

**Исследование остаточных напряжений их величины, знака и характера распределения при фрезеровании заготовок с использованием метода конечных элементов и феноменологических моделей пластичности и разрушения Джонсона-Кука – метод. указания к лабораторной работе / сост. Евдокимов Д.В. – Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2017. – 28 с.**

Показано применение компьютерной вычислительной техники для проведения исследований по определению величин, знака и характера распределения остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок на операциях фрезерования. Для анализа остаточных напряжений используется компьютерная модель, основанная на методе конечных элементов. В структуре модели используются феноменологические модели пластичности и разрушения Джонсона-Кука.

Предназначены для проведения лабораторной работы студентам специальности ТКМ 221400.62, ТКМ 160400.62, ТКМ 151600.62, ОКМ 141100.62, ОКМ 160700.65.

Выполнены на кафедре технологий производства двигателей Самарского университета.

УДК 621.914.1

© Самарский университет, 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
1. .ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИКЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ.....	4
2. .МЕХАНИЗМ НАВЕДЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ .....	6
3. .СТРУКТУРА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ.....	10
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ А ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ.....	29
ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОБРАЗЕЦ БЛАНКА ОТЧЕТА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ.....	30

**Цель работы:** ознакомление с принципами работы в инженерных программных пакетах; ознакомление с областью применения конечно-элементных программных пакетов; получение знаний о физике процесса резания и механизме наведения остаточных напряжений при обработке материалов.

## **1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЗИКЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

Современное производство характерно своей устойчивой тенденцией к усложнению промышленных изделий и использованию материалов, вызывающих сложности при механической обработке. В первую очередь это касается изделий авиационной техники. Данная тенденция во многих случаях приводит к необходимости изготовления высокоточных деталей со сложным фасонным профилем, работающих в условиях знакопеременных нагрузок и высоких температур. Поэтому при изготовлении таких деталей значительное место уделяется состоянию поверхностного слоя [1-3], определяющего в значительной мере надежность и долговечность детали и изделия в целом.

Остаточные напряжения, формируемые в поверхностном слое заготовок при резании и являющиеся одним из основных параметров, определяющих качество обработки, возникают в результате воздействия силового и температурного полей в зоне резания, а количество теплоты, выделяющееся в зоне обработки, зависит от главной составляющей силы резания и скорости обработки [1]. Если температура в зоне резания достигает значений, соответствующих значениям критических точек аллотропических превращений в поверхностном слое материале заготовки, то влияние температуры на формирование поверхностного слоя существенно возрастает.

Значительное место в технологических процессах изготовления деталей отводится операциям фрезерования. При этом нередко опера-

ции фрезерования являются окончательными операциями, определяющими состояние поверхностного слоя деталей [1-3]. Поэтому существует необходимость в разработке и совершенствовании методик, позволяющих определять, знак, величину и характер распределения остаточных напряжений в поверхностном слое заготовок на операциях фрезерования. На основе методик ведется подбор оптимальных режимов обработки и оптимальной геометрии режущего инструмента для получения требуемого качества поверхностного слоя детали.

В лабораторной работе предлагается ознакомиться с одной из таких методик, которая базируется на программе конечно-элементного анализа. В ходе лабораторной предлагается получение и анализ полей остаточных напряжений сформированных в поверхностном слое виртуальной заготовки по итогу численного эксперимента по фрезерованию.

## **2. МЕХАНИЗМ НАВЕДЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАЛОПЛАСТИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

При механической обработке возникают остаточные пластические деформации (деформационное упрочнение). Эти деформации вызывают изменение линейных размеров обработанного поверхностного слоя детали, однако нижележащие упругонапряженные слои, с которыми упрочненный слой неразрывно связан, противодействуют отмеченным изменениям. В результате возникают остаточные напряжения того или иного знака с уровнем, который может достигать предела прочности обрабатываемого материала.

На рисунке 1 приведена схема свободного резания, где выделена окружность равных напряжений, соответствующая условию  $\sigma_r = \sigma_i = \sigma_t$ , т.е. металл внутри этой окружности под действием силы  $R$ , пластически деформируется.



большая ось которого с направлением вектора скорости резания составит угол  $\eta_2$ . При переходе к последующим сечениям 3, 4, 5 качественная картина деформационных процессов сохраняется, т.е. в сечении 3 исходная частица превратится в эллипс с углом наклона большой оси  $\eta_3$ , в сечении 4 –  $\eta_4$ . Деформация частиц и углы  $\eta_i$  в различных сечениях будут неодинаковыми.

При резании вместе с формирующей силой  $R$  движется и пластическая зона, т.е. вначале частица в виде окружности попадает в сечение 1, затем – в сечение 2, где она деформируется, превращаясь в эллипс и т.д., причем в последующих сечениях деформация будет нарастать. Максимальная деформация, а стало быть, и напряжения возникают в сечении, для которого полярный угол равен  $\frac{\omega}{2}$ . При дальнейшем перемещении частицы она будет проходить области, где радиальные напряжения уже ниже. В конечном итоге все частицы поверхностного слоя изделия оказываются в области  $\sigma_r = \sigma_i = \sigma_\tau$  и, пройдя ее, формируют поверхностный слой детали.

Поверхностный слой детали после резания деформационно упрочняется. Отдельные частицы материала имеют остаточную деформацию, причем угол между направлением максимального удлинения и вектором скорости резания колеблется в пределах  $\eta = \frac{\omega}{2} = 15^\circ \dots 25^\circ$ . При такой направленности остаточных деформаций  $\eta < 45^\circ$  поверхностный слой стремится удлиниться в направлении вектора скорости резания, но нижележащие упругонапряженные слои, составляющие единое целое с поверхностным деформированным слоем, препятствуют этому. Поэтому поверхностный слой оказывается в состоянии остаточного сжатия, а нижележащие слои, препятствующие удлинению верхнего слоя, – в состоянии остаточного растяжения.



В общем случае необходимо рассматривать деформацию частицы материала в поверхностном слое не в виде окружности малого диаметра, а в виде шара малого диаметра. Исходная частица в виде шара при попадании в область пластического деформирования превратится в эллипсоид, и поверхностный слой наряду с удлинением в направлении вектора скорости резания будет также стремиться удлиниться в перпендикулярном направлении (перпендикулярное направление к плоскости рисунка 1), а это значит, что и в этом направлении поверхностный слой окажется в состоянии остаточного сжатия. Направление, совпадающее с вектором скорости, именуется как тангенциальное, перпендикулярное которому, направление является радиальным, а направление перпендикулярное плоскости рисунка 1 является осевым.

### 3. СТРУКТУРА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

В ходе лабораторной работы предлагается определять остаточные напряжения, формирующиеся в поверхностном слое заготовки при концевом фрезеровании алюминиевого сплава Д16 (деформируемый сплав, дюраль) на различных режимах резания при ширине фрезерования 3 мм и глубине фрезерования 5 мм. Для этого была разработана компьютерная модель в программе «*Abaqus*».

*Особое внимание стоит обратить на то, что в программе нет размерностей и поэтому размерность результатов расчета будет соответствовать размерностям величин исходных данных, которые были внесены в программу (полная аналогия с калькулятором).*

При запуске программы открывается окно, которое представлено на рисунке 2.

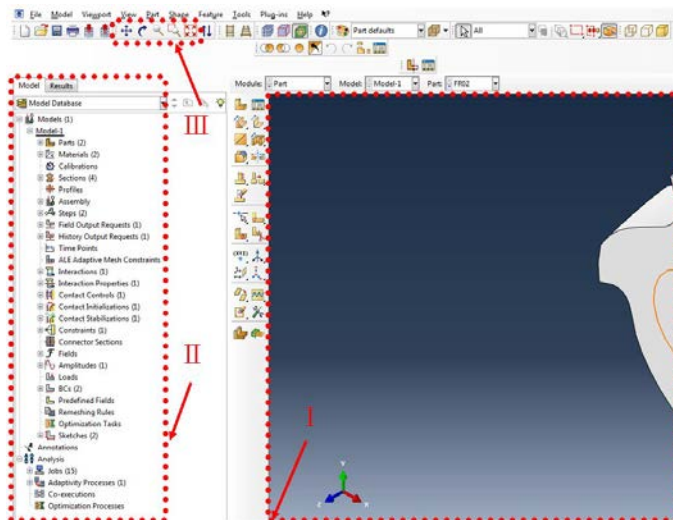



Рис. 2 – Рабочее поле компьютерной модели

На рис. 2, цифрой I обозначено поле визуализации виртуальных тел. По тем же телам отображаются поля остаточных напряжений по результату вычислений. Для вращения и перемещения виртуальных тел внутри поля используются инструменты, показанные в рамке под цифрой III на рис. 2. В случае «потери» виртуальной геометрии из поля I, необходимо воспользоваться иконкой  из поля III рис. 2.

*Ниже до указанного момента будет представлено описание той структуры компьютерной модели, которая не предусматривает вмешательство со стороны студентов во время проведения лабораторной работы.*

### **Дерево построения компьютерной модели**

С деревом построения модели возможно ознакомиться, посмотрев в программе на зону рабочего окна, отмеченного рамкой II на рис. 2.

#### ***Строка Parts***

Виртуальная геометрия компьютерной модели представлена в виде двух тел, заготовки и участка концевой фрезы (рис. 3).

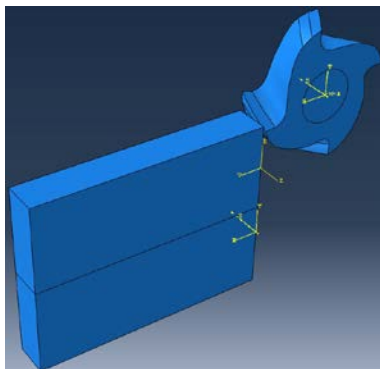


Рис. 3 – Виртуальные тела компьютерной модели

В дереве построения компьютерной модели, виртуальные геометрии обозначены в строке «*Parts*» как «*FR02*» и «*Part-3*» (рис. 4.).

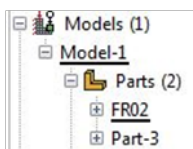


Рис. 4 – Пункт «*Parts*» дерева построения модели

### **Строка *Materials***

Следующим этапом в строке «*Materials*» было задано поведение материала заготовки и фрезы в процессе виртуальной обработки, с помощью моделей эластичности, пластичности и модели разрушения. Модель пластичности и модель разрушения представлены уравнениями Джонсона-Кука двух видов: “*Johnson-Cook flow stress model*” и “*Johnson-Cook Fracture Model*”. В дереве построения компьютерной модели, строка «*Materials*» содержит в себе список всех материалов с их описанием, которые будут использованы для виртуальных тел, задействованных в процессе численного эксперимента. В разработанной модели присутствуют два материала «*CUT\_STEEL*» и «*ALUMINIUM*», а их структуру внутри программы можно видеть на рис. 5.

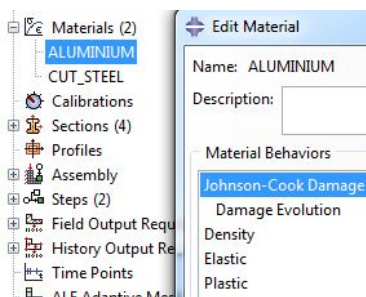


Рис. 5 – Строка «*Materials*» и ее компоненты

Материалы «*CUT\_STEEL*» и «*ALUMINIUM*» имеют следующую структуру в своем описании (строки в таблице «*Edit Material*», рис. 5):

- 1) *Density* (плотность материала).
- 2) *Isotropic Elasticity* (Изотропная эластичность).

Во вкладку внесены значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона.

- 3) *Johnson Cook Strength* (модель пластичности, которая также называется «*Johnson Cook flow stress model*»)

Модель представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука:

$$\sigma_o = \left[ A + B(\varepsilon^p)^n \right] \cdot \left[ 1 + C \log \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \cdot (1 - \hat{T}^m), \quad (1)$$

$$\hat{T} = \begin{cases} 0 & \text{при } T < T_c \\ \frac{T - T_c}{T_{nl} - T_c} & \text{при } T_c \leq T \leq T_{nl} \\ 1 & \text{при } T > T_{nl} \end{cases},$$

где  $\sigma_o$  – напряжения пластического течения материала;  $\varepsilon^p$  – эквивалентная пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}^p$  – скорость пластической деформации материала;  $\dot{\varepsilon}$  – справочная скорость пластической деформации (обычно, перед тем как определять коэффициенты зависимости (1), данное значение принимается равным  $1\text{с}^{-1}$ ), что упрощает вычисление напряжений пластического течения по уравнению (1);  $T_c$  – справочная температура (принимается обычно равной комнатной температуре);  $T_{nl}$  – температура плавления обрабатываемого материала;  $A$  – предел текучести материала, соответствующий справочным скоростям деформации и температуры;  $B$  – модуль деформационного упрочнения;  $n$  – показатель степени деформационного упрочнения;  $m$  – экс-

понента термопластичности;  $C$  – показатель чувствительности к скорости деформирования.

4) *Johnson Cook Failure* (модель разрушения, которая также называется «*Johnson Cook fracture model*»)

Модель представлена в виде феноменологической зависимости Джонсона-Кука:

$$\bar{\varepsilon}_f = \left[ D_1 + D_2 \exp \left( D_3 \cdot \frac{\sigma_m}{\bar{\sigma}} \right) \right] \cdot \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o} \right) \right] \cdot (1 + D_5 T),$$

где  $\sigma_m$  является средней величиной по трем главным напряжениям,  $\bar{\sigma}$  – эквивалентные напряжения, полученные по критерию пластичности фон Мизеса,  $\bar{\varepsilon}_f$  – эквивалентная деформация при разрушении, а  $D_i$  – это коэффициенты, получаемые по результату экспериментов.

Данная модель в программе имеет подвкладку «*Damage Evolution*», где приведены данные, характеризующие кривую  $AB$ , продемонстрированную на рис. 6, где точка  $A$  обозначает начало разрушения материала, а  $B$  завершение этого процесса.

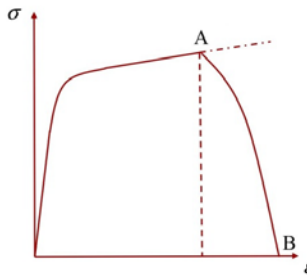


Рис. 6 – Кривая напряжение - деформация

### ***Строка Sections***

Следующая строка дерева компьютерной модели называется «*Sections*», где перечисляются среды, из которых состоят конечно-элементные виртуальные тела компьютерной модели. Данные среды включают в себя не только всю информацию о материалах, заданную в пункте «*Materials*», но и данные о категории конечных элементов (*Solid, Beam, Shell, Fluid* и т.д.), и о типе конечного элемента внутри категории (однородный, композитный, Эйлера и т.д.). На рис. 7 представлена строка «*Sections*» и ее компоненты.

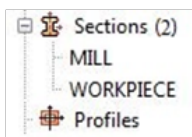


Рис. 7 – Строка «*Sections*» и ее компоненты

### ***Строка Section Assignments***

«*Section Assignments*» служит для того, чтобы присвоить среду (информацию о категории, типе конечных элементов, материале) виртуальной геометрии. Данная строка находится в пункте «*Parts*» (рис. 4, 8).

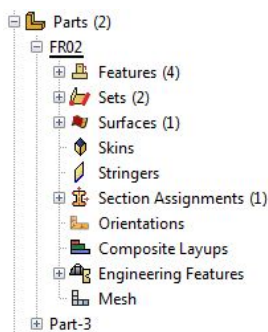


Рис. 8 – Элемент дерева строки «*Parts*»

Там же находится пункт «*Mesh*», нажав на который программа отобразит сеточную модель виртуального тела. Для настройки сетки конечных элементов используются пункты вкладки «*Mesh*», находящейся в главном меню (рис. 9).

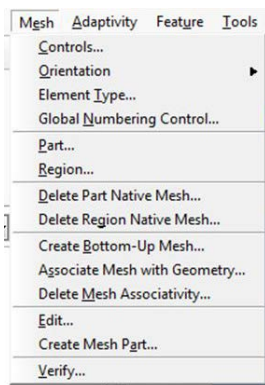


Рис. 9 – Вкладка «*Mesh*» главного меню

*С текущего этапа будет представлено описание той структуры компьютерной модели, где необходима ее настройка в соответствии с режимом обработки, который указан в варианте.*

### ***Строка Steps и алгоритм задания режима обработки***

Вкладка «*Steps*» содержит подпункты «*Initial*» и «*Step-1*». В «*Initial*» в строке «*BCs (1)*» есть пункт «*BC-2 (created)*», где задано граничное условие для заготовки – фиксация по поверхностям, выделенным на рис. 10.



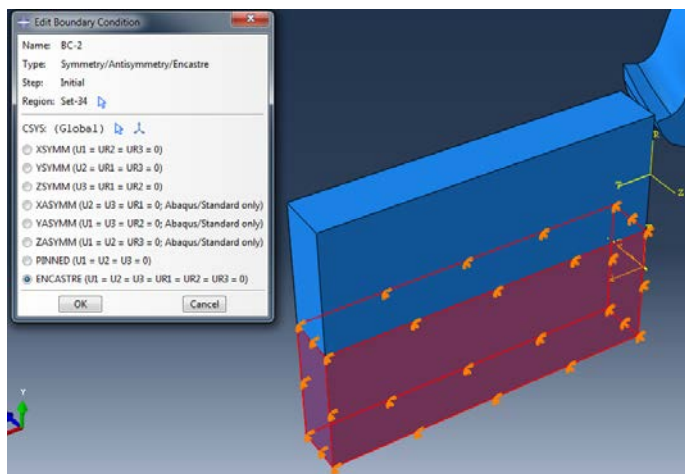


Рис. 10 – Фиксация виртуального тела заготовки

Для того, чтобы задать необходимый режим обработки необходимо выполнить следующую последовательность в действиях.

Для определения временного периода симуляции процесса фрезерования необходимо дважды нажать на строку «Step-1», что во вкладке «Steps», после чего откроется окно «Edit Step», там же есть пункт «Time period», где указывается время симуляции  $T$ . К примеру, для себя определим, что это будет одна секунда и так как в «Abaqus» нет размерностей, запишем в окно «Edit Step» 1, запомнив для себя, что это секунда (рис. 11).

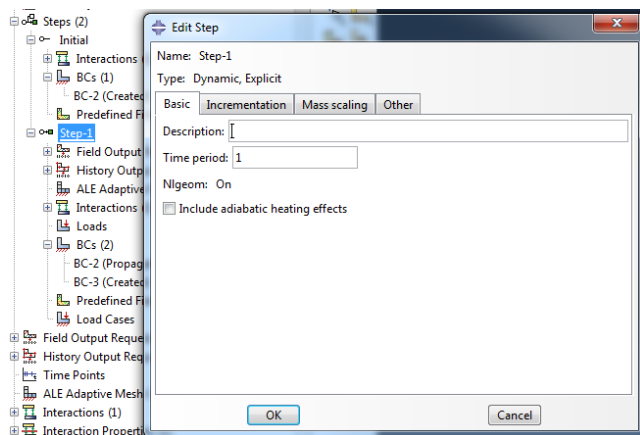


Рис. 11 – Определение времени симуляции

Далее все в той же вкладке «*Step-1*» необходимо раскрыть строку «*BCs (2)*», после чего раскроются еще две строки «*BC-2 (propagated)*» и «*BC-3 (created)*». Нажав два раза на «*BC-3 (created)*» откроется «*Edit Boundary Condition*», там же в строке «*V1:*» нужно указать перемещение оси вращения фрезы в направлении подачи. Сама по себе строка «*V1:*» предполагает скорость движения, а это значит, что для данной модели фрезерования предполагается задание минутной подачи. Для этого необходимо выбрать отрезок времени, например, в 0,1 с и для него вычислить перемещение фрезы в соответствии с минутной подачей. Данное перемещение в миллиметрах заносится в строку «*V1:*». Временной отрезок должен выбираться небольшой, связи с двумя положениями:

1) Процесс фрезерования сопровождается большими скоростями деформации и для того чтобы была возможность детальней его изучить по компьютерной модели, целесообразно рассматривать короткие периоды времени;

2) При автоматическом подборе шага итерации, точность вычислений выше при относительно коротких временных периодах.

После строки «V1:» необходимо заполнить строку «VR3:», где указывается скорость вращения фрезы. В строку вносится величина оборотов фрезы в **радианах** за выбранное время (в примере 0,1 с). Пример показан на рис. 12.

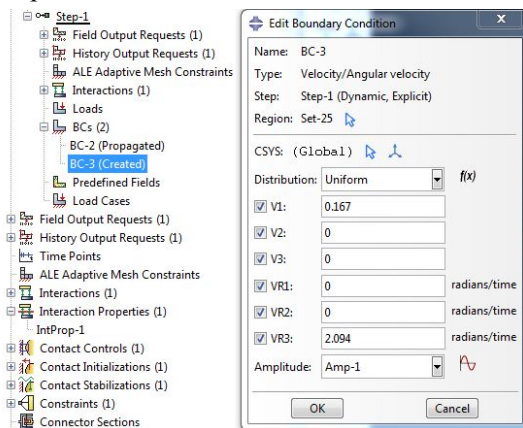


Рис. 12 – Определение кинематики фрезы

### **Строка Amplitudes**

«Amplitudes» содержит подпункт «Amp-1», в котором задается закон изменения данных, внесенных в таблицу «Edit Boundary Condition». Для процесса фрезерования изменение перемещения и вращения будет иметь линейный характер, т.е. для начальной временной точки множитель для данных таблицы «Edit Boundary Condition» будет равен нулю, тогда как для конечного времени симуляции, которое было определено в «Time period» (в примере, на рис. 11, обозначено как 1 с), множитель составит значение, равное 10. Это объясняется тем, что в таблице «Edit Boundary Condition» все перемещения соот-

ветствуют временному отрезку в 0,1 с, а время симуляции составляет 1 с. Пример показан на рис. 13.

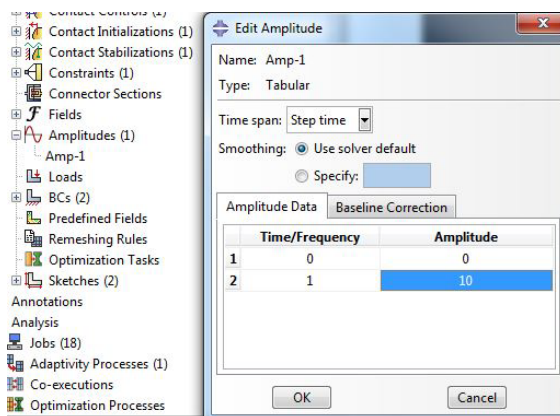


Рис. 13 – Окно подпункта «Amp-1»

### ***Строка Analysis***

Для запуска задачи на расчет необходимо выполнить следующие действия. В начале раскрыть вкладку «Analysis» и нажать два раза на строку «Jobs». В открывшемся окне «Create Job», в строке «Name» необходимо написать название расчета, например «Job-9» и нажать «continue». Далее откроется окно «Edit Job», где ничего изменять не нужно, а остается только нажать на «ok». После этого задача появится в списке задач вкладки «Jobs», так как показано на рис. 14.

Следующим действием из списка необходимо выбрать задачу, которая была создана, например, «Job-9» и нажать на нее правой кнопкой мыши. В открывшемся меню нужно нажать на «Submit», тем самым будет выполнен запуск на расчет.

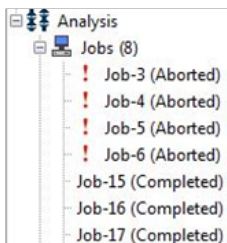


Рис. 14 – Пункт  
«Analysis» со спис-  
ком задач

В списке задач, справа от каждой задачи в скобках указывается ее статус (рис. 14), например, «Aborted» обозначает ошибку, в результате которой была прервана задача. Если статус стоит «Submitted», то задача находится в процессе ее решения, а «Completed» обозначает завершенность процесса вычисления.

*При выполнении лабораторной работы может возникнуть ситуация, когда компьютерный расчет может оказаться дольше, чем отведенное для него время в рамках занятия. Также может оказаться, что в силу различного рода проблем, спустя определенное количество итераций, задача может прерваться с появлением пометки «Aborted», т.е. симуляция пройдет не на все заданное время. В подобных ситуациях рекомендуется сразу переходить к снятию результатов, согласно ниже представленной инструкции.*

### **Результаты вычислений**

Для того, чтобы посмотреть результаты вычисления, необходимо два раза нажать на строку с задачей, например, на «Job-9 (Completed)», после чего откроется окно «Edit Job». Его будет необходимо закрыть, однако данная операция необходима для однозначности выбора строки задачи. Далее на ту же строку нужно нажать правой кнопкой мыши и в появившемся окне нужно нажать «Results», после чего откроется окно, пример которого показан на рис. 15.

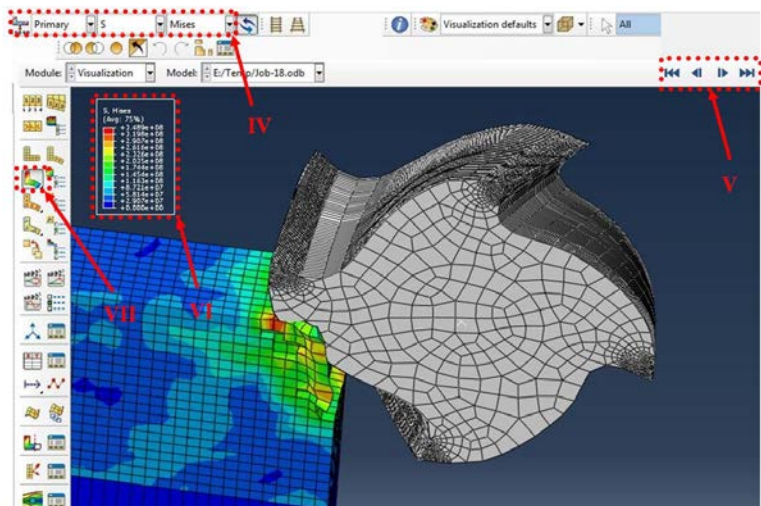


Рис. 15 – Окно результатов вычисления

На рис. 15 обозначено окно результатов, где для вращения и перемещения виртуальных тел также используются инструменты, показанные под цифрой III на рис. 2. Легенда значений показана под цифрой VI (рис. 15). Чтобы компьютер отображал поля искомой величины, необходимо нажать на иконку под цифрой VII. Для управления кадрами движения фрезы используются инструменты, показанные в рамке V рис. 15. Отображаемая величина устанавливается в окнах, показанных под цифрой IV.

### ***Анализ результатов***

В лабораторной работе необходимо предоставить значения максимальных остаточных напряжений ( $\sigma_{x\max}$ ,  $\sigma_{y\max}$ ,  $\sigma_{z\max}$ ), действующих в трех основных направлениях и глубины залегания максимальных остаточных напряжений  $h_{\max}$  и остаточных напряжений в целом  $h$ .

Для того, чтобы узнать величину остаточных напряжений, действующих в направлении нормальном к поверхности заготовки, т.е. ось  $Y$  в компьютерной модели, необходимо, в указанном окне под цифрой IV на рис. 15 сменить «*Mises*» на «*S22*». Для вывода на экран полей остаточных напряжений, ориентированных в направлении оси фрезы, т.е. ось  $Z$  в компьютерной модели, необходимо установить параметр «*S33*». Для вывода на экран полей остаточных напряжений, ориентированных в направлении подачи, т.е. ось  $X$  в компьютерной модели, необходимо установить параметр «*S11*».

Так как остаточные напряжения это те напряжения, которые остаются в заготовке после снятия нагрузки, то для оценки остаточных напряжений по компьютерной модели, необходимо проводить симуляцию резания с заданным временем, позволяющем обработать виртуальную заготовку полностью. Однако в рамках лабораторной работы это неосуществимо в силу долготы полного расчета. Именно этим обусловлено небольшое время симуляции, выбранное для выполнения работы, а также большой размер конечных элементов виртуальных тел компьютерной модели. Качественный расчет подразумевает не менее пяти конечных элементов в толщину снимаемой стружки. Таким образом, для того чтобы определить остаточные напряжения в рамках лабораторной работы, необходимо, управляя кадрами с помощью кнопок панели V (рис. 15) выставить фрезу так, чтобы ее зубья не касались заготовки или был оголен значительный участок заготовки, не подвергающийся силовому воздействию со стороны зуба фрезы, так как показано на рис. 16.

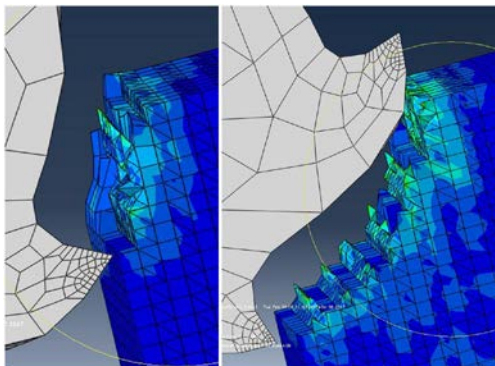


Рис. 16 – Этап регулировки положения фрезы

Далее необходимо провести секущую плоскость по заготовке, с нормалью перпендикулярной к оси фрезы и параллельной направлению подачи. Для этого необходимо нажать на кнопку VIII, рис 17 (активировать секущие плоскости).

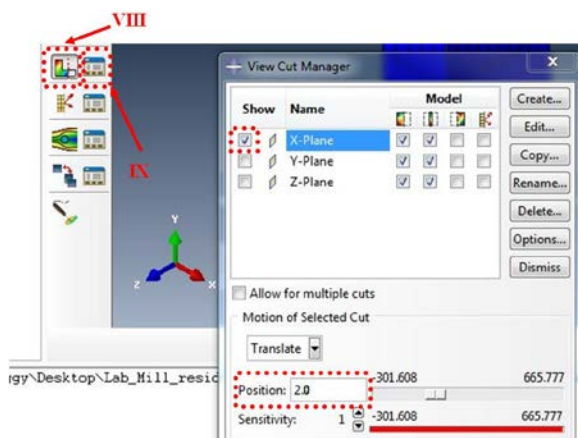


Рис. 17 – Окно выбора секущей плоскости



Там же, справа от нее кнопка IX, на которую необходимо нажать и установить галочку в открывшемся окне «*View Cut Manager*» так, как показано на рис 17, кроме того в строке «*Position*» устанавливается в миллиметрах отступ от начала заготовки, где начало заготовки располагается со стороны движения фрезы. Отступ устанавливается в соответствии с тем требованием, что секущая плоскость должна проходить через обработанную зону, которая не подвергается силовому воздействию. Максимальная величина остаточных напряжений и их знак указывается в легенде, на рис. 15 в рамке обозначенной как VI. Для того чтобы увеличить размер легенды нужно в главном меню нажать на вкладку «*Viewport*», там выбрать «*Viewport Annotation Options*». В появившемся окне нажать вкладку «*Title Block*» и там нажать на кнопку «*Set Front*», установить галочку напротив «*Legend*», а в строке «*size*» установить требуемый размер.

Для анализа глубины залегания остаточных напряжений  $h$  рекомендуется выставить отображение напряжений «*Mises*» (рис. 15, IV панель), нажать на кнопку «*Query*» и в появившемся окне выбрать «*Distance*», после этого будет необходимо выделить крайние точки слоя на срезе полученным секущей плоскостью, где сконцентрированы остаточные напряжения, так как показано на рис. 18.

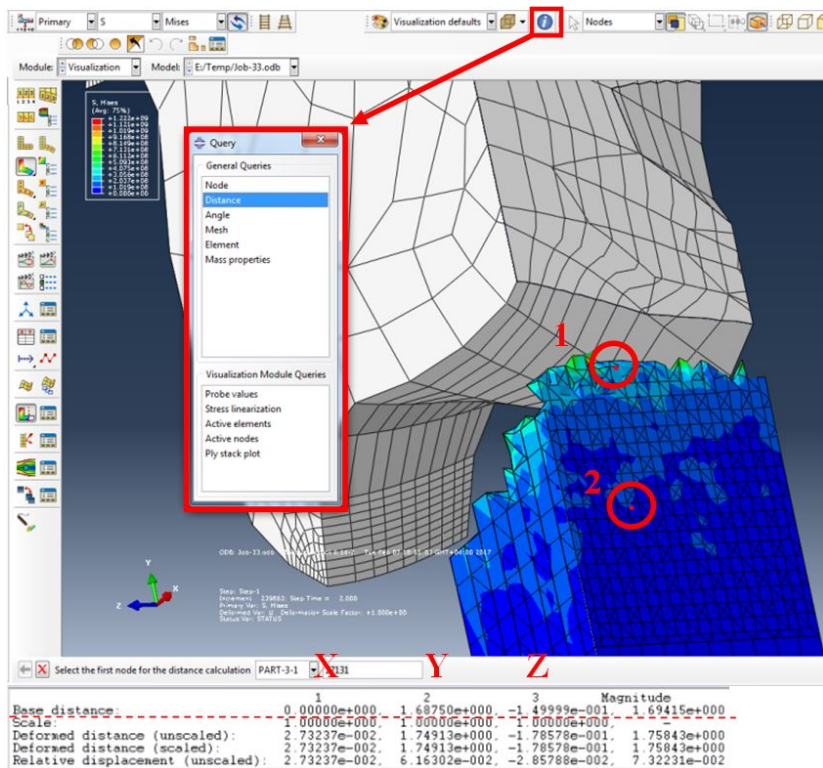


Рис. 18 – Этап анализа глубины залегания остаточных напряжений

В диалоговом окне программы, что находится в самом низу экрана, должна появиться таблица, где интересующая глубина залегания остаточных напряжений будет отображена в строке «*Base distance*» под цифрой 2, которая обозначает ось «Y». Подобным образом определяется глубина залегания максимальных остаточных напряжений  $h_{max}$ . В случае, если они находятся на самой поверхности заготовки, в бланке указывается 0.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. С какой целью определяются величины остаточных напряжений?
2. Почему важно учитывать знак остаточных напряжений?
3. Какие три основных составляющих остаточного напряжения в точке при резании вы знаете?
4. Какие преимущества предоставляет виртуальный эксперимент перед реальным?
5. Каким образом влияет величина конечных элементов на точность вычислений?
6. Какие данные необходимо определить для материала, чтобы провести симуляцию процесса резания?
7. Какие факторы влияют на образование остаточных напряжений?
8. Какие параметры влияют на время вычисления?
9. Какой знак имеют остаточные напряжения, повышающие предел выносливости детали? Как они называются? Как называются противоположные им остаточные напряжения?
10. Каким образом задается материал в компьютерной модели?
11. Каким образом задается режим обработки в компьютерной модели?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко, Б. А. и К. Ф. Митряев. Обработка и выносливость высокопрочных материалов. – Куйбышев: Куйбышевское книжное издательство, 1968. – 132 с.
2. Zhongtao, F., Y. Wenyu, W. Xuelin and L. Jürgen. Analytical modelling of milling forces for helical end milling based on a predictive machining theory // *Procedia CIRP*, 2015. – V. 31. – P. 258-263.
3. Majzoobi, G. H., F. Freshteh-Saniee, S. Faraj et al. Determination of materials parameters under dynamic loading. Part I: Experiments and simulations // *Computational Materials Science*, 2010. – V. 49. – Is. 2. – P. 192-200.
4. Shrot, A. and M. Bäker. Determination of Johnson-Cook parameters from machining simulations // *Computational Materials Science*, 2012. – V. 52. – Is. 1. – P. 298-304.
5. Šlais, M., I. Dohnal and M. Forejt. Determination of Johnson-Cook equation parameters // *Acta Metallurgica Slovaca*, 2012. – V. 18. – No. 2-3. – P. 125-132.
6. Rajendran, R., M. Venkateshwarlu, V. Petley and S. Verma. Strain hardening exponents and strength coefficients for aeroengine isotropic metallic materials – a reverse engineering approach // *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 2014. – V. 23. – Is. 3-4. – P. 47-128.
7. Ozel, T. and Y. Karpat. Identification of constitutive material model parameters for high-strain rate metal cutting conditions using evolutionary computational algorithms // *Materials and manufacturing processes*, 2007. – V. 22. – Is. 5. – P. 659-667.
8. Резников А. Н. Теплофизика резания. – М.: Машиностроение, 1969. – 288 с.

# **ПРИЛОЖЕНИЕ А** **ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**

№ вар.	$t$ , мм	$n$ , Об/мин	$S_m$ , мм/мин	$B$ , мм	$\alpha$	$\gamma$	$\omega$	$\mu$	$T$ , с
1	5	500	160	3	13	7	44	0,15	1
2	5	500	180	3	13	7	44	0,15	1
3	5	500	200	3	13	7	44	0,15	1
4	5	500	250	3	13	7	44	0,15	1
5	5	630	160	3	13	7	44	0,15	1
6	5	630	180	3	13	7	44	0,15	1
7	5	630	200	3	13	7	44	0,15	1
8	5	630	250	3	13	7	44	0,15	1
9	5	720	160	3	13	7	44	0,15	1
10	5	720	180	3	13	7	44	0,15	1
11	5	720	200	3	13	7	44	0,15	1
12	5	720	250	3	13	7	44	0,15	1
13	5	800	160	3	13	7	44	0,15	1
14	5	800	180	3	13	7	44	0,15	1
15	5	800	200	3	13	7	44	0,15	1
16	5	800	250	3	13	7	44	0,15	1

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**ОБРАЗЕЦ БЛАНКА ОТЧЕТА ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ**

Студент \_\_\_\_\_

Кафедра \_\_\_\_\_  
*технологий производства*      Группа \_\_\_\_\_      Дата \_\_\_\_\_  
*двигателей*

**О Т Ч Е Т**  
По лабораторной работе

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ  
ИХ ВЕЛИЧИНЫ, ЗНАКА И ХАРАКТЕРА РАСПРЕДЕЛЕНИ  
ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ЗАГОТОВОК  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
И ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ  
ПЛАСТИЧНОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ ДЖОНСОНА-КУКА**

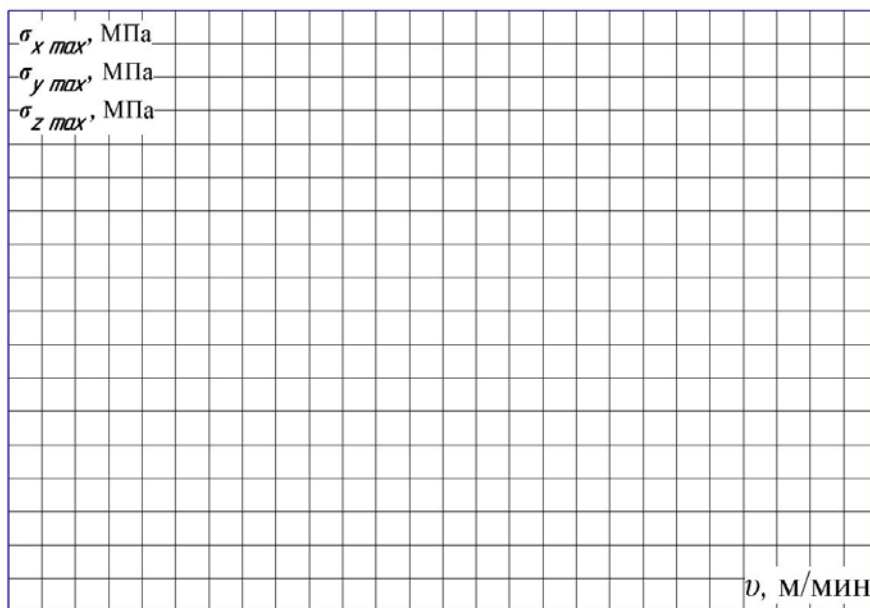
1. Исходные данные к выполнению работы

№ вар.	$t$ , мм	$n$ , Об/мин	$S_m$ , мм/мин	$B$ , мм	$\alpha$	$\gamma$	$\omega$	$\mu$	$T$ , с

2. Определение величин составляющих остаточных напряжений, их глубины залегания и глубины нахождения максимального остаточного напряжения.

$\sigma_{x\max}$ , МПа	$\sigma_{y\max}$ , МПа	$\sigma_{z\max}$ , МПа	$h$ , мм	$h_{\max}$ , мм

4. Ниже необходимо построить графики зависимости составляющих максимальных остаточных напряжений от скорости резания (используются данные всей группы).



## 8. Индивидуальное задание

## 9. Выводы по работе



Преподаватель \_\_\_\_\_

